

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-382-08

冀东沿海穿堂式农宅冬季室内热湿环境 实测及节能改造分析

张峰 赵金玲 朱禹昊 韩雪

(大连理工大学建设工程学部 大连 116024)

【摘要】 针对冀东沿海农宅室内热湿环境及节能改造问题,对当地穿堂式典型农宅和新型农宅进行采暖期室内热湿环境实测,分析室内温度、相对湿度及风速的变化及分布特点,分析建筑热工、采暖系统等因素对当地室内热湿环境及建筑热损失的影响,对当地典型农宅提出节能改造方案并进行了模拟分析。研究结果表明,当地农宅存在围护结构传热系数高于当地农宅传热系数限值、热桥效应明显、散热末端布置不合理等现象,增设南向阳光间可以使主卧室夜间最低温度提高2~3℃、温度日较差降低1.5℃,缓解当地典型三开间穿堂式农宅采暖期热损失大等问题。

【关键词】 冀东;沿海;农宅;热湿环境;节能

中图分类号 TU832 文献标识码 A

Analysis of Winter Indoor Thermal Environment Measurement and Renovation of Eastern Hebei Coastal Through-hall Rural House

Zhang Feng Zhao Jinling Zhu Yuhao Han Xue

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024)

【Abstract】 In order to analyze the influence of building thermal performance and heating system on indoor thermal environment of coastal rural house in the eastern of Hebei province, the characterizations of indoor thermal environment of typical and original through-hall rural house were measured during the heating period, such as the trends and distribution of indoor temperature, relative humidity and wind speed. In order to reduce building energy consumption, a renovation plan for the typical house was proposed and its energy-saving effect was simulated. The research results reveals that heat transfer coefficient of building envelop is over its limits in GB 50824-2013, the effect of thermal bridges is obvious, and the radiators were unreasonably arranged. With an attached sunspace, the nighttime minimum temperature of bedroom increases by 2~3℃, and the diurnal range reduces by 1.5℃. The plan can decrease the heat loss of the through-hall three-bay rural house during the heating period.

【Keywords】 Eastern of Hebei; coastal; rural houses; thermal environment; energy saving

基金项目:“十三五”国家重点研发项目“村镇建筑需求适应性被动太阳能供暖技术研究”(编号:2018YFD1100701-2)

作者简介:张峰(1996-),男,在读硕士研究生,E-mail: zfpdudt@163.com

通讯作者:赵金玲(1974-),女,博士,副教授,E-mail: zhaojinling@dlut.edu.cn

收稿日期:2021-04-30

0 引言

根据国家发改委等十部委联合发布的《北方地区冬季清洁取暖规划(2017-2021年)》,北方地区农村供热平均综合能耗为27kgce/m²,约为城镇建

筑的1.4倍^[1]。“清洁供、节约用”是农村清洁取暖的基本路径。尽管我国已经于2013年发布《农村居住建筑节能设计标准》^[2],但是由于各地农宅的营造模式、建筑材料和施工水平差异较大,既有农

宅围护结构热工性能差仍是取暖能耗大的主要原因, 从需求侧上提高农宅围护结构热工性能、降低取暖能耗是农村地区清洁取暖的重要前提。

京津冀地区人口密集, 常住 1 亿人口的四成以上是农村人口, 因此, 京津冀地区的农村建筑节能是重中之重。河北省东部的唐山、秦皇岛等地区濒临渤海, 当地农宅的营造模式与内陆地区有所差别。王斐^[3]对冀东滨海乡村居住形态的调查研究表明: 穿堂式三开间农宅是唐山、沧州及秦皇岛等地区农宅的主要形式。穿堂式农宅设计不仅方便居民通行, 还能够强化自然通风, 在湖南、安徽等南方潮湿炎热地区也有较多应用^[4]。对于冀东沿海地区农宅, 岳丽芳^[5]基于 DeST 软件分析唐山市农宅本体节能改造的节能潜力, 发现墙体保温改造的节能率可达 33%, 屋面保温改造的节能率可达 12%; 严龙山^[6]对秦皇岛市农村进行了风光互补供暖系统研究, 经济性分析表明该系统寿命周期在 20 年以上时, 每年可平均节省采暖费用 400 余元; 薛会文^[7]设计了适宜河北省的太阳能生物质能互补采暖房, 改造后室内温度可达 14℃以上。对于冀东附近地区农宅的研究, 陈梦源^[8]以天津市农宅为例, 基于 PHPP 和 Matlab 软件对节能改造方案进行了经济性分析, 以降低门窗传热系数、提高太阳得热系数为主的节能改造方案。总体上看, 关于冀东沿海地区农宅节能的研究多聚焦于清洁能源互补采暖系统的研发, 针对冀东沿海农宅建筑构造特点的节能改造研究有待深入。

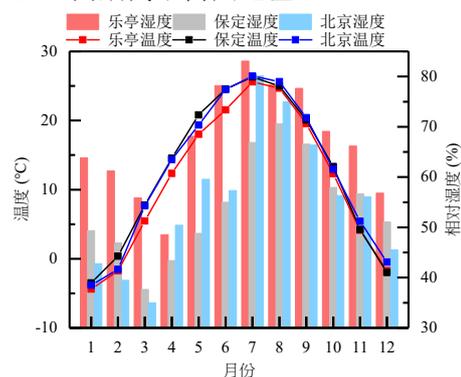
为分析冀东沿海农宅室内环境现状及主要成因、制定因地制宜的农宅节能改造方案, 本文对唐山地区沿海农宅进行实测研究, 分析地域气候及围护结构热工水平对当地农宅室内环境的影响, 提出以热缓冲空间为主的节能改造方案, 并通过数值模拟预测改造后室内热环境, 为当地农宅节能改造技术提供理论依据。

1 实测农宅概况

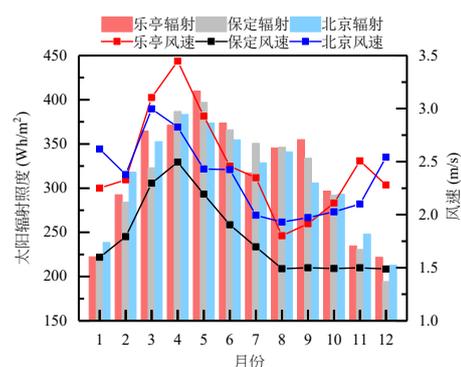
1.1 地理位置及气候特点

冀东沿海地区(唐山、秦皇岛等)属暖温带滨海半湿润大陆性季风型气候, 春季干燥多风, 夏季闷热多雨, 秋季昼暖夜寒, 冬季寒冷少雪。最冷月平均气温 -4.1~-7.7℃, 最热月平均气温 24.9~26.6℃^[10]; 年平均日照时数 2527.8h, 年总太阳辐射量

5.0~5.3GJ/m²^[11]。为了考察冀东沿海与京津冀内陆地区气候的差别, 以唐山市乐亭县作为冀东沿海地区代表, 与同纬度的北京、保定两市进行气候参数对比^[12], 如图 1 所示。冀东沿海地区的气候特点表现在: 受海洋蓄热作用影响, 春夏季温度低于内陆地区 2~3℃; 相对湿度明显高于内陆地区, 冬季室外空气相对湿度在 55%以上; 太阳辐射水平与同纬度内陆地区比较接近; 春夏过渡季室外风速最大可近 3.5m/s, 同期高于内陆地区 0.5m/s。



(a) 温湿度水平对比



(b) 太阳辐射照度及风速对比

图 1 冀东沿海与同纬度内陆地区气候参数对比

Fig.1 Comparison of Climate Parameters between Eastern Hebei Coast and Inland Areas at the Same Latitude

1.2 穿堂式农宅建筑布局

冀东沿海农宅的院落布局一般呈矩形。主房位于院落中间, 坐北朝南, 南北有院, 各农户之间的主房东西向联排呈“一字型”。主房的典型构造为穿堂式三开间, 如图 2 所示。堂屋设置在中间, 南北均设置外门, 连通南北院子, 便于居民进出。厨房位于堂屋南门进口处, 卧室位于堂屋的东西两侧。



图 2 冀东沿海地区典型穿堂式农宅平面示意图

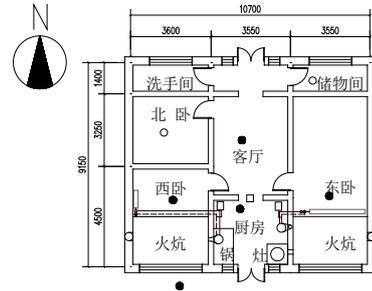
Fig.2 Layout of Typical Coastal Through-hall Rural House in Eastern Hebei

1.3 实测农宅基本信息

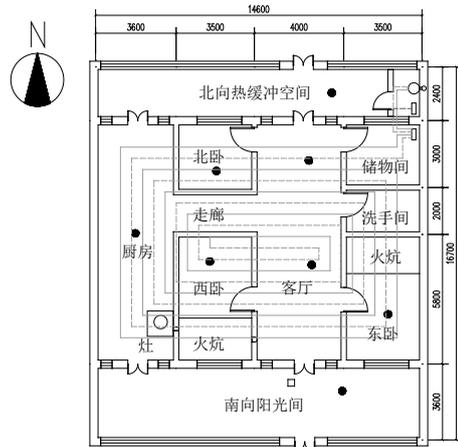
本研究以唐山市乐亭县的农宅为对象开展实测研究。乐亭县（东经 39°，北纬 119°）海岸线长达 100 多公里，有河北省沿海第一县之称，紧邻京唐港、曹妃甸港两大港区，交通便利，经济发展良好，当地居民外流少，对该地区农宅进行节能改造具有较大实用价值。

根据现场考察，当地的典型农宅采用穿堂式三开间布局，约占农宅总数的 90%以上。典型农宅一般于 2010 年前建成，采用砖木结构，屋顶使用苇帘作为防潮层，采暖设备以火炕和土暖气为主。另外，当地还有少量新型农宅，多为近 10 年内新建的农宅，布局上保留了穿堂式构造，采用砖混结构，使用以炉灶为热源的地板采暖系统，房间布局多样化，于南北侧增加了南向阳光间和北向热缓冲空间。本研究在当地典型农宅和新型农宅中各选取一户

作为实测对象，实测农宅的平面图如图 3 所示，建筑热工基本信息列于表 1。



(a) 典型农宅



(b) 新型农宅

●为温湿度记录仪、○为温度记录仪、□为万向风速仪

图 3 实测农宅建筑平面图

Fig.3 Layout of Measured Rural House

表 1 实测农宅基本信息

Table 1 Basic Information of the Measured Rural Houses

实测对象	典型农宅	新型农宅
建筑信息		
建造时间	2010	2017
构造形式	砖木结构	砖混结构
建筑面积 (m ²)	98	156
热缓冲空间	北侧缓冲空间	南向阳光间+北向缓冲空间
外墙	10 mm 水泥砂浆+370 mm 红砖+10 mm 水泥砂浆+10 mm 瓷砖 (K=0.97 W/(m ² ·K))	10 mm 水泥砂浆+370 mm 红砖+10 mm 水泥砂浆+10 mm 瓷砖 (K=0.97 W/(m ² ·K))
外窗	塑钢单层玻璃 (K=5.0 W/(m ² ·K))	铝合金单层玻璃 (K=6.5 W/(m ² ·K))
围护结构	外门	铝合金半玻门 (K=5.0 W/(m ² ·K))
构造	屋面	铝合金半玻门 (K=6.5 W/(m ² ·K))
	3 mm 苇帘+50 mm 苇芭+50 mm 黏土+80 mm 煤渣混凝土+1 mm 彩钢板 (K=0.81 W/(m ² ·K))	150 mm 钢筋混凝土+100 mm EPS 保温板+150 mm 混凝土+5 mm 水泥瓦 (K=0.50 W/(m ² ·K))
	地面	10 mm 地砖+50 mm 煤渣混凝土 (K=5.58 W/(m ² ·K))
		10 mm 地砖+50 mm 煤渣混凝土+60 mm EPS 保温板 (K=0.39 W/(m ² ·K))

续表 1 实测农宅基本信息

实测对象	典型农宅	新型农宅
供暖方式	土暖气+灶连炕	地暖辐射盘管灶连炕
供暖范围	两间主卧	全部房间
采暖设备	煤、秸秆	煤
采暖成本(元)	1500	4000

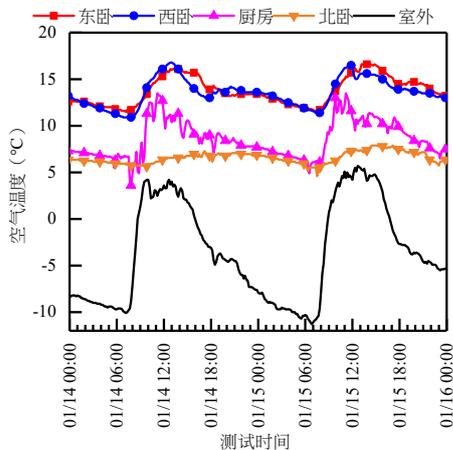
1.4 测试方法

于 2019 年 1 月 11 日至 1 月 15 日对典型农宅和新型农宅同时进行连续 5 天的实测, 对两户农宅主要房间温度、相对湿度及室内风速、风温进行测试。测点布置如图 3 所示。温湿度自记仪(型号: Testo 175-H1; 测试精度: 0.1°C)测点布置于房间中心区域附近, 远离采暖设备, 另外为防止太阳辐射对实测结果产生影响使用锡箔纸包裹仪器探头; 风速仪(型号: WFWZY-1; 测试精度: 0.1m/s、0.1°C)布置于堂屋门口附近。

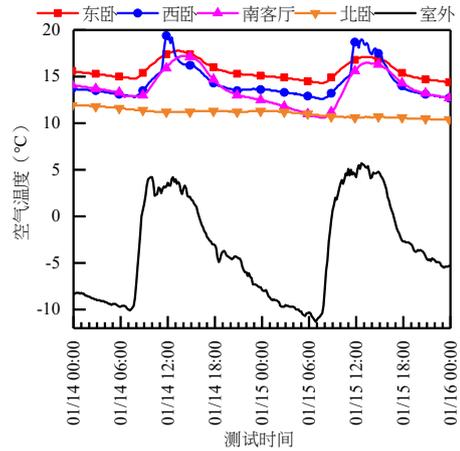
2 典型农宅和新型农宅室内热湿环境参数分析

2.1 农宅室内温度的变化及分布

测试期间, 典型农宅和新型农宅室内外逐时温度变化曲线如图 4 所示, 各房间温度分布如图 5 所示。结合图 4 与图 5 可见, 典型农宅东、西卧室的室内温度 70% 以上时间高于 12°C, 厨房温度高于 12°C 的时间不足 20%, 北向房间日最高温度低于 10°C。采暖与非采暖房间之间温度差距较大, 日平均温度相差近 8°C。新型农宅东、西卧室的室内温度近 70% 以上时间高于 14°C, 北卧室也有 60% 的时间高于 12°C, 各房间日平均温度相差低于 5°C。



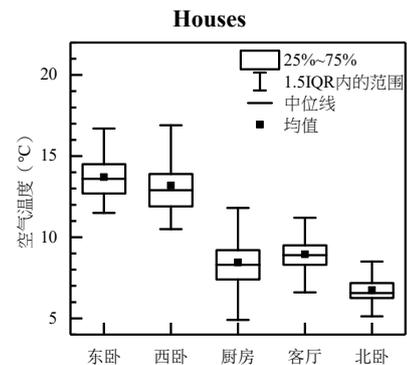
(a) 典型农宅不同功能房间温度变化



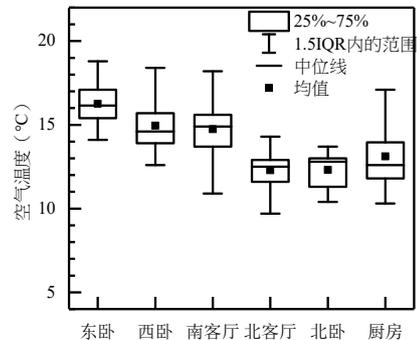
(b) 新型农宅不同功能房间温度变化

图 4 农宅各房间逐时温度变化

Fig.4 Temperature Change in Each Room of the Rural Houses



(a) 典型农宅各房间空气温度箱线图



(b) 新型农宅各房间空气温度箱线图

图 5 农宅各房间温度分布

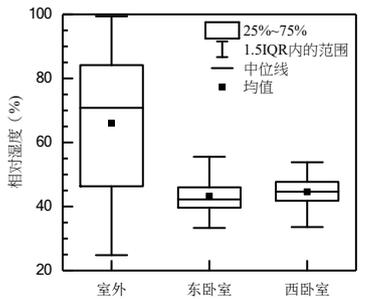
Fig.5 Temperature Distribution in Every Room of the Rural Houses

由于靠近经常开启的南外门，图 4 中典型农宅的厨房温度日较差为 10℃，新型农宅的客厅温度日较差为 6~7℃，是温度波动最剧烈的房间，也是造成建筑热损失的关键区域。由于没有南向热缓冲空间，典型农宅厨房温度日较差比新型农宅客厅高 50% 以上。

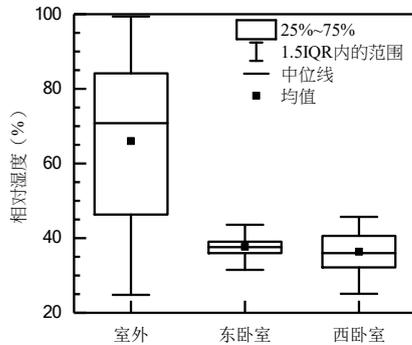
《农村居住建筑节能设计标准》^[2]规定，寒冷地区农宅室内计算温度应取 14℃，其条文说明指出：80% 的农户认为 13~16℃ 是冬季较为舒适的采暖室内温度。因此，本研究取室内温度在 14±2℃ 时较为适宜。由此，典型农宅仅有南向卧室的室内温度 70% 以上的时间处于舒适区，厨房仅有 20% 的时间温度高于 12℃，北向房间日最高温度不足 10℃。而新型农宅全部房间 60% 以上的时间处于舒适区。

2.2 农宅相对湿度

受海洋气候影响，冀东沿海农宅冬季室内湿环境较为适宜。如图 6 所示，实测期间室外平均相对湿度约为 65%；新型农宅相对湿度水平略低于典型农宅，典型农宅室内平均相对湿度约为 45%，新型农宅室内平均相对湿度在 35%~40% 之间。



(a) 典型农宅主卧相对湿度箱线图



(b) 新型农宅主卧相对湿度箱线图

图 6 农宅主卧相对湿度

Fig.6 Relative Humidity of Bedrooms in Rural Houses

2.3 堂屋入口处风速

典型农宅和新型农宅南向外门附近的室内风速及风温变化曲线如图 7 所示。从风速变化趋势上看，两户农宅日间风速普遍高于夜间，最大相差近 0.1m/s；对比两户农宅的风速，日间两户农宅风速水平比较接近，夜间新型农宅风速低于典型农宅，最大相差 0.5m/s。从测点处空气温度上看，新型农宅堂屋入口处空气温度高于典型农宅 10℃ 以上，夜间两者温度相差不大。南向阳光间对室内风速水平的影响不大，但是其日间堂屋入口处温度水平有所提高，削弱冷风侵入、冷风渗透的传热损失。

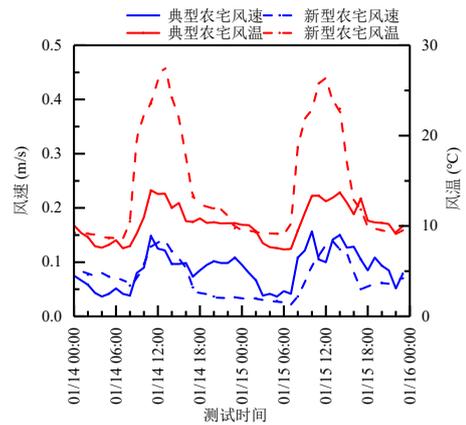


图 7 农宅室内堂屋风环境

Fig.7 Wind Environment of the Hall of the Rural House

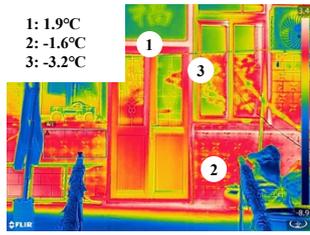
2.4 农宅室内环境影响因素分析

2.4.1 围护结构热工水平的影响

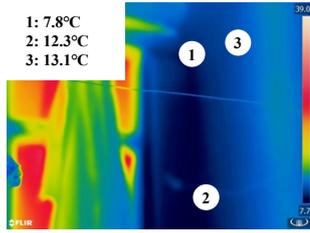
针对典型农宅，由表 1 可知，所测试的农宅围护结构传热系数普遍低于寒冷地区农村建筑传热系数限值（门窗传热系数限值 2.5W/(m²·K)；外墙传热系数限值 0.65W/(m²·K)；屋面传热系数限值 0.50W/(m²·K)；地面传热系数限值 1.6W/(m²·K)）^[12]，其中门窗与传热限值的差距最大，门窗当前传热系数是传热系数限值的两倍。

当地农宅的施工比较粗糙，尤其是外门、外窗、墙角等节点处存在明显的热桥效应。如图 8 (a) 所示，典型农宅的外门边框温度比墙体高 5.1℃。如图 8 (b) 和 (c) 所示，典型农宅墙角处温度比非缺陷处低 5.3℃，新型农宅的墙角处温度也比非缺陷处低约 3.4℃。

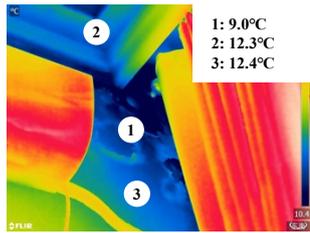
另外，穿堂式的建筑布局使得门窗换热面积增加、冷风渗透也有所加剧，进而导致传热热损失增加、堂屋温度日较差增大。



(a) 典型农宅南向门窗



(b) 典型农宅西卧西南墙角



(c) 新型农宅东卧东南墙角

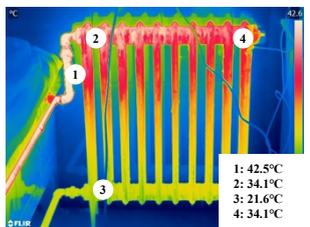
图 8 建筑热工缺陷内外表面红外图像

Fig.8 Infrared Images of Internal and External Surfaces of Building Thermal Defects

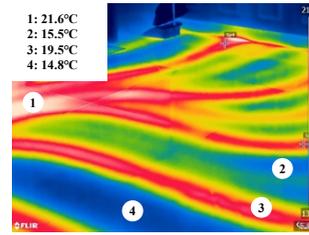
2.4.2 采暖系统和设备使用不当的影响

农宅冬季室内温度水平及温度分布受到采暖设备末端布置范围和散热能力的影响。如图 9 所示, 对于典型农宅, 在非做饭期间土暖气的供水一般为 40°C 左右, 散热器表面与室内空气的温差较低。此外, 土暖气只布置在南向卧室, 造成南北向房间温差较大。

对于新型农宅, 地板辐射采暖系统可明显提高室内舒适性。但是, 由于设计和施工不规范, 存在地下盘管间距过大问题, 造成局部空间温度分布不均匀, 地暖盘管处与非地暖盘管处温差最大可达 5.3°C。



(a) 典型农宅土暖气



(b) 新型农宅地暖盘管

图 9 采暖末端表面红外图像

Fig.9 Infrared Images of Radiator Surfaces

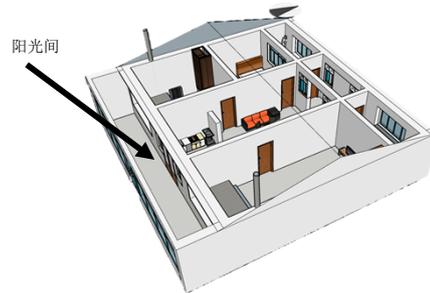
3 典型农宅的热缓冲空间节能改造及效果分析

鉴于冀东沿海农宅的冬季室内环境特点及成因分析, 本研究主要从围护结构角度针对典型农宅进行节能改造方案分析。

结合《被动式太阳能建筑技术规范》^[13]及冀东沿海新型农宅的热缓冲空间营造模式, 提出对典型农宅增设南向阳光间的改造方案, 其目标功能是在较低围护结构改造成本条件下削弱南向围护结构热桥的热损失, 并降低冷风侵入和冷风渗透热损失。典型农宅节能改造前后的示意图如图 10 所示。



(a) 改造前



(b) 改造后

图 10 典型农宅围护结构节能改造前后示意图

Fig.10 Layout of the Typical Rural House before and after Envelope Energy Saving Renovation

为了预测南向阳光间的节能效果,本研究利用 DesignBuilder 软件进行建模。阳光间的设计参数设置为进深 2m、窗墙比 80%, 为了对比不同类型门窗对阳光间传热的影响, 分别选取常用的塑钢门窗 ($K=5.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) 和断桥铝双层玻璃门窗 ($K=2.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) 进行分析。选择典型气象年^[12]冬至日 12 月 23 日至 12 月 24 日的气象数据, 对典型农宅没有山墙的东卧室进行节能改造效果数值模拟分析。

典型农宅增设阳光间前后东卧室的温度模拟结果如图 11 所示。增设阳光间后, 东卧夜间最低温度比改造前上升 1.5~2.5℃; 日较差从 4.5℃下降至 3℃。此外, 改造后 12:00~18:00 温度变化幅度不足 1℃, 而改造前同期温度变化幅度约为 2℃。

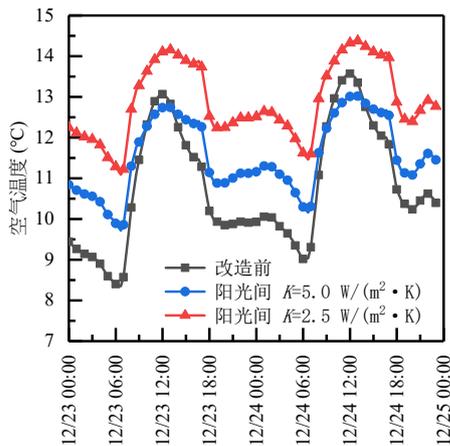
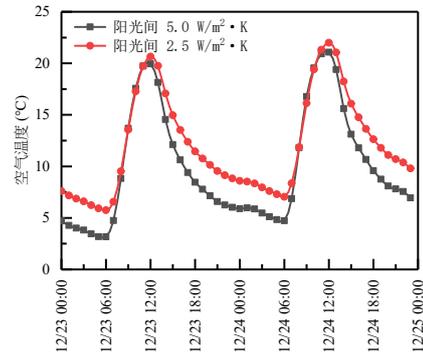


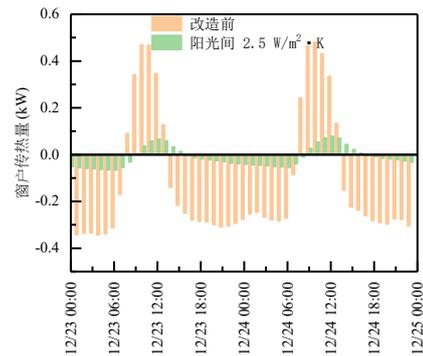
图 11 阳光间改造前后东卧温度对比分析

Fig.11 Comparison Analysis of the Temperature of the East Bedroom before and after the Sunspace Renovation

图 12 (a) 对比分析了阳光间门窗保温性能提高对阳光间内空气温度的影响, 阳光间门窗传热系数下降后, 阳光间 12 点之后的温度下降趋势变缓, 其夜间最低温度提高了 2~3℃。图 12 (b) 反映了阳光间改造后对东卧室窗户传热量的影响, 该传热量主要包括窗户日照得热和传热损失, 图 12 (b) 中传热量为正表示日照得热大于传热损失, 传热量为负表示夜间传热损失。可见阳光间改造后虽然东卧窗户日照得热有所下降, 但其全天总传热损失减小。



(a) 门窗传热系数对阳光间温度的影响



(b) 改造前后东卧窗户传热损失对比

图 12 阳光间改造对比分析

Fig.12 Comparative Analysis of Sunspace Renovation

4 结论

(1) 据调研及实测结果, 冀东沿海地区典型农宅各房间中仅主卧温度较为舒适, 其他房间温度较低。当地农宅南侧堂屋温度日较差同比最大, 是热损失比较严重的区域。

(2) 冀东沿海地区农宅围护结构热工性能不佳, 其表现在围护结构传热系数不满足当地农宅传热系数限值要求, 建筑节点热桥效应明显; 在采暖设备上, 存在散热表面温度不高、散热末端布置不合理等问题。此外, 穿堂式设计加剧冷风侵入现象, 传热损失增加导致。

(3) 实测表明热缓冲空间可改善穿堂式设计对室内环境的影响, 因此通过能耗模拟分析阳光间的改造效果。改造后夜间最低温度上升 2~3℃, 主卧温度日较差降低 1.5℃, 且提高门窗传热系数可进一步提高阳光间及卧室室内温度水平, 降低传热损失。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发北方地区冬季清洁取暖规划(2017-2021年)的通知[EB/OL]. 2020-03-31.http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm.
- [2] GB 50824-2013, 农村居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [3] 王斐. 冀东滨海乡村住居形态研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [4] 方冠楠. 穿堂风在湖南地区住宅设计中的研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [5] 岳丽芳, 史新立, 吴少艳. 唐山地区农村住宅建筑本体节能技术研究[J]. 节能, 2019, (4): 22-25.
- [6] 严龙山, 于军琪. 农村建筑风光互补供暖系统的经济运行分析与研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(7): 85-89.
- [7] 薛会文, 边志敏, 王建生, 等. 河北省太阳能生物质能互补采暖房技术研究初报[C]. 2014年中国太阳能热利用行业年会暨高峰论坛, 2014.
- [8] 陈梦源. 被动房技术在天津地区农宅应用中的能耗与成本控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [9] GB50176-2016, 民用建筑热工设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [10] 袁淑杰, 李晓虹, 张益炜, 等. 河北省水平面太阳总辐射时空分布及太阳能资源评估研究[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(11): 50-55.
- [11] EnergyPlus supplement, version 9.4[M]. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2020.
- [12] GB50176-2016, 民用建筑热工设计手册[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [13] JGJ/T 276-2012, 被动式太阳能建筑技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(上接第358页)

- [11] 姜学鹏, 刘琪. 隧道火灾点式排烟时机械补风风速研究[J]. 科技导报, 2013, 31(8): 5-10.
- [12] Jiang X, Liu M, Wang J, et al. Study on induced airflow velocity of point smoke extraction in road tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 637-643.
- [13] Mawhinney J R, Trelles J. Performance testing of fire protection systems in tunnels: Integrating test data with CFD simulations[C]. Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, 2010: 297-309.
- [14] Fire Engineering Guidelines[M]. 1st ed. Australia: Fire Code Reform Center Limited, 1996.
- [15] 中华人民共和国公安部消防局. 中国消防手册: 第三卷: 消防规划·公共消防设施·建筑防火设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2006.